

文章编号: 1000-8241(2018)01-0040-06

射流清管器结构参数与清管积液运移特性

陈建恒¹ 何利民¹ 罗小明¹ 李清平² 姚海元²

1. 中国石油大学(华东)/山东省油气储运安全省级重点实验室; 2. 中海油研究总院

摘要: 明确清管器结构参数对射流清管器运行规律及射流效果的影响, 对于保障管道流动安全、顺利完成清管作业尤为重要。对某实际天然气凝析液管道进行清管模拟, 分析清管器旁通率、摩擦力等结构参数对其运动特性及清管段塞的影响, 并研究凝析液和液态水在射流清管过程中运动规律的差异。结果表明: 射流清管器平均速度随旁通率的增加呈线性下降趋势, 旁通率增加可以显著降低清管段塞量, 平缓气量波动; 摩擦力对模拟结果具有重要影响, 若模拟前清管器摩擦力计算偏小, 将导致清管段塞的预测值大幅增加; 液态水和天然气凝析液在射流清管过程中的运动特性差异较大, 液态水的存在会一定程度上削弱射流清管效果。(图 11, 表 1, 参 20)

关键词: 射流清管器; 旁通率; 摩擦力; 清管段塞; 积液

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.01.008

Structural parameters of bypass pig and movement characteristics of liquid loading in the process of pigging

CHEN Jianheng¹, HE Limin¹, LUO Xiaoming¹, LI Qingping², YAO Haiyuan²

1. Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety, China University of Petroleum (East China);

2. CNOOC Research Institute

Abstract: To ensure pipeline flow safety and carry out pigging operation smoothly, it is of great significance to figure out the effects of structural parameters of bypass pig on its movement laws and cleaning effectiveness. In this paper, pigging simulation was carried out on an actual natural gas condensate pipeline. The effects of the structural parameters (e.g. bypass fraction and friction force) of bypass pig on its movement characteristics and pigging slug were analyzed. Besides, the difference of movement laws between the gas condensate and the liquid water in the process of bypass pigging was studied. It is shown that with the increase of bypass fraction, the average velocity of bypass pig decreases linearly, the pigging slug volume drops remarkably and gas rate fluctuation is flattened. The friction force has a great impact on the simulation results. And the predicted pigging slug will increase greatly if the friction force of the pig before the simulation is underestimated. The movement characteristics of liquid water and gas condensate in the process of bypass pigging differ a lot, and the existence of liquid water can to a certain extent, weaken the effectiveness of bypass pigging. (11 Figures, 1 Table, 20 References)

Key words: bypass pig, bypass fraction, friction force, pigging slug, liquid loading

清管是管道生命周期内必不可少的环节, 是管道流动安全的重要保障。天然气凝析液管道长期运行导致管内积液增加^[1-2], 在清管过程中清管器运行速度过快将会导致清管段塞过大, 进而造成下游接收终端的溢流^[3]。射流清管器在钢骨架上开设气体旁通通道, 降低前后驱动压差, 减小清管器运行速度, 使更多的积液从系统中自然排放, 能够显著减小清管段塞量, 在降

低清管风险方面具有极大的优势^[4-8]。射流清管器结构参数主要包括由钢主轴上旁通孔径决定的旁通率, 以及主轴外部的密封结构和尺寸。旁通率影响清管器的驱动力, 密封结构和尺寸影响清管器的摩擦力, 清管操作的关键在于寻求驱动力与摩擦力的平衡^[9]。因此, 深入研究旁通率、摩擦力等结构参数对清管器运行速度以及清管效果的影响, 有利于优化清管操作。

目前,关于旁通率与射流清管效果的报道仅局限于一些工程案例^[3-4,6-7],未系统深入地对分析旁通率、清管器速度及清管段塞量的内在关系。在射流清管操作前,清管器与管壁间摩擦力的不确定性是造成模拟工况与实际工况差异的重要因素^[10],量化清管器摩擦力、清管器运动特征及清管段塞量之间的关系,有利于明确摩擦力的影响范围。对于射流清管积液的研究尚局限于终端流出的段塞总量^[3-7,10],并未深入分析流出积液的组成以及水和凝析液随射流过程运动规律的差异,因此需要进一步研究积液的运移特性,使射流清管的内在机理更加明确。

1 射流清管器运行速度的影响因素

射流清管器运动是复杂的流体动力学变化过程。准确预测并控制清管器运行速度和清管段塞量是清管操作成功的关键^[11-15]。Singh等^[16]通过对水平管中清管器的运动过程进行受力分析,忽略运动加速度,提出了射流清管器运行速度的计算公式:

$$v_{pig} = v_{gas} - \frac{d^2}{D^2} \sqrt{\frac{F_f}{\frac{\pi}{8} C \rho_{bp} D^2}} \quad (1)$$

式中: v_{pig} 为射流清管器速度, m/s; v_{gas} 为清管器上游的驱动气速, m/s; d 为旁通孔直径, m; D 为管道内径, m; F_f 为清管器与管壁的摩擦力, N; C 为清管器前后的压降系数; ρ_{bp} 为旁通孔中流体的密度, kg/m^3 。

根据式(1),对于无旁通孔的普通清管器, $d=0$, 则 $v_{pig}=v_{gas}$, 即清管器运行速度和驱动气速一致。若增加旁通孔面积,清管器速度将偏离驱动气速而降低。压降系数 C 主要是射流通道结构的函数^[16-18], 因此对于特定旁通结构的射流清管器,控制清管器运动速度的关键参数为旁通率($\phi=d^2/D^2$)与摩擦力 F_f 。

2 模型建立

利用 OLGA 软件模拟某实际天然气凝析液管道(图 1)的清管工况。该管道内径 508 mm,长 77.8 km,出口压力 2.5 MPa。

依据实际工程数据,在 OLGA 模型中分段设置相应的管道传热条件,并设定进出口压力温度等边界条

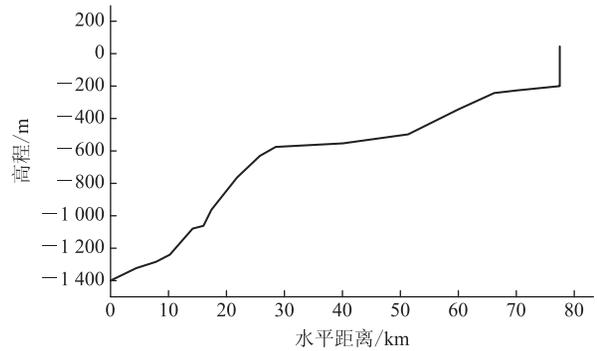


图 1 某天然气凝析液管道路由高程示意图

件,使之与实际工况相适应。通过改变旁通率与摩擦力,分析其对清管器运行特性与清管段塞的影响,并对摩擦力进行敏感性分析。此外,通过改变物性含水率,得到不同的水气比,以此研究射流清管过程中水和凝析液运行规律的差异性。

3 旁通率变化

3.1 清管器速度变化特性

分析射流清管器运行速度在 10 种不同旁通率 ϕ 下随运行时间的变化规律(图 2)。清管器的整体运行过程较为平稳,在一定旁通率下,随着运行时间的延长,清管器运行速度逐渐增加,当清管器到达管道出口时,其速度有一阶跃上升的变化趋势。由于在天然气管道系统中,气体流动是一个逐渐加速的过程,因此清管器的驱动力在运行过程中也逐渐增加,速度亦随之增大。在管道出口处,系统压力大幅降低,使清管器速度产生突变,急剧增加,加大了收球端的风险。而随着旁通率的增加,清管器前后方气体的流通性增强,驱动压差减小,进而使清管器速度降低,清管时间延长(从旁通率为 0 的 6.2 h 延长至旁通率为 18% 的 10.3 h)。且随着旁通率的增大,管道出口的清管器速度峰值减

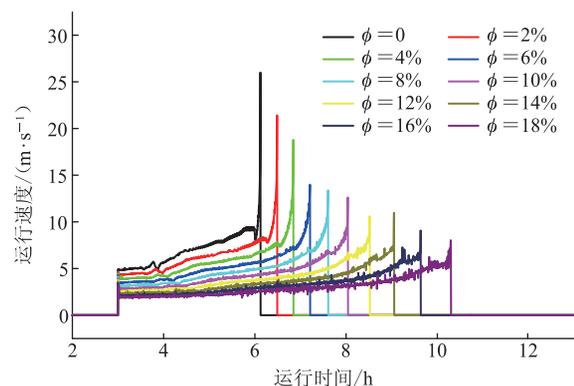


图 2 不同旁通率下清管器运行速度随时间的变化曲线

小,降低了收球风险。天然气管道清管器运行速度区间以2~7 m/s为宜^[13],因此,选择合适的旁通率可以使清管器运行速度合理地分布在该区间内。

通过计算管道全长与清管时间的比值即可获得清管器的平均速度(图3)。清管器平均速度 v'_{pig} 与旁通率 ϕ 的拟合曲线为 $v'_{pig}=6.528-21.022\phi$ 。分析可知,清管器的平均速度随旁通率的增加而下降,与线性拟合曲线的最大偏差为7.4%,吻合度较高。

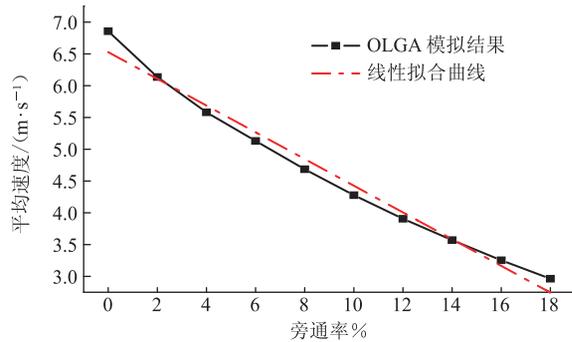


图3 清管器平均速度随旁通率的变化曲线

综上,选择合适的旁通率,可以获得理想的清管器运行速度,进而优化该气田的实际清管操作。

3.2 清管积液流出特性

根据不同旁通率下管道终端液体流量随时间的变化规律(图4)可知:随着旁通率的增大,终端液体流量逐渐减小(峰值流量从旁通率为0的1.6 m³/s减小至旁通率为18%的0.2 m³/s)。当旁通率较大时,液体的流出过程较为缓和,可为下游段塞流捕集器赢得更多的处理时间,降低了生产溢流风险。旁通率增大一方面使清管器速度降低,减小其前方积液的流动速度,另一方面,使旁通孔内的旁通气量增大,对前方液塞的吹扫和剪切携带作用增强,使更多的积液在清管段塞头部到达终端前,自流出管道,从而显著降低清管段塞体长度和段塞量,使流出的清管段塞量下降。

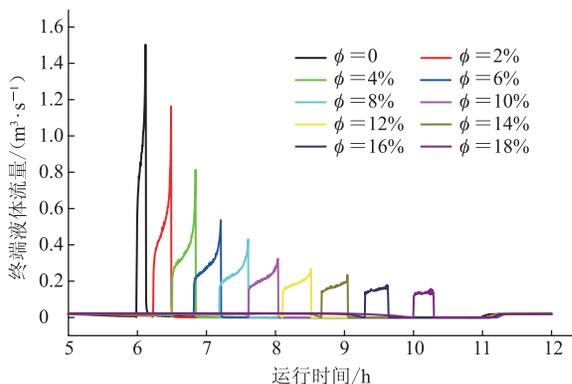


图4 不同旁通率下管道终端液体流量随时间的变化曲线

根据清管段塞头部到达终端前管内自流出的液体总量随旁通率的变化曲线(图5)、清管段塞量 V_{PG} 和捕集器内缓冲液量 V_S 随旁通率的变化曲线(图6)可知:随旁通率的增加,在清管段塞头部到达终端前,以自流的形式被排出管道的积液量增加;清管段塞量和缓冲液量随着旁通率的增加而减少,并且二者的变化趋势相同。其中,清管段塞量和缓冲液量的表达式分别为:

$$V_{PG}=H-H_{flow}=H-t_f Q_l \quad (2)$$

$$V_S=V_{PG}-(t_{pig}-t_f)Q_{drain} \quad (3)$$

式中: H 为管道总积液量, m³; H_{flow} 为清管段塞头部到达终端前自流出的液量, m³; t_f 为从清管器发射直至段塞头部到达终端的时间, h; Q_l 为 t_f 时间段内终端液体流速, m³/h; t_{pig} 为清管器运行时间, h; Q_{drain} 为下游段塞流捕集器的排液流速, m³/h。

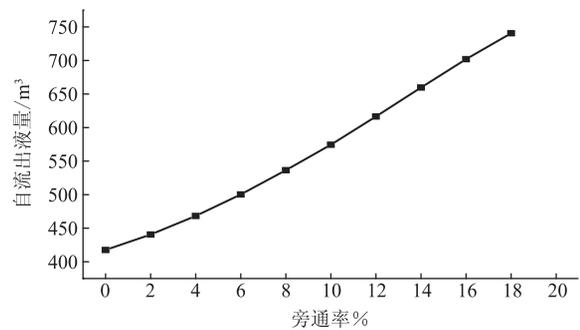


图5 清管段塞头部到达终端前管内自流出的液量随旁通率的变化曲线

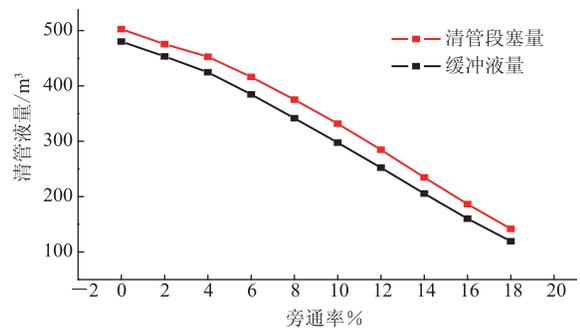


图6 清管段塞量和缓冲液量随旁通率的变化曲线

对比式(2)与式(3)可知:清管段塞量和缓冲液量之差为在清管段塞进入捕集器时间段内下游捕集器的排液量 $(t_{pig}-t_f)Q_{drain}$ 。基于安全设计的角度,进行射流清管旁通率优选和清管效果分析时,可以将 V_{PG} 作为衡量标准。若 V_{PG} 满足设计要求,则缓冲液量将在段塞流捕集器的处理范围内,满足安全生产要求。

3.3 气量波动特性

根据不同旁通率下管道出口气量(转化为标准状

态)随运行时间的波动曲线(图7)可知:当清管段塞到达管道出口时,终端气量具有明显的波动。在低旁通率下,清管段塞体内的截面液相分率较高,阻碍了气体的流体通道,背压积聚。随着液塞的流出,被堵塞的气体压力瞬间得到释放,造成流量的大幅波动。这也是清管器到达终端产生速度突变的主要原因。随着旁通率的增大,清管段塞量减少,同时截面液相分率下降,对气体的阻碍作用降低,气体流通性增大,系统背压减小,出口流量波动亦随之下降。因此,通过增大旁通率可以平缓出口的气量波动,减少对下游生产设备的冲击。

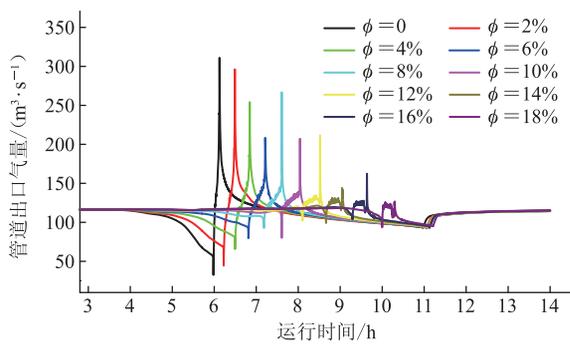


图7 不同旁通率下管道出口气量随时间的变化曲线

4 摩擦力变化

模拟过程中清管器与管壁间摩擦力计算不准确将直接导致下游段塞流捕集器容积的设计错误^[10],因此,准确计算清管器摩擦力对模拟结果至关重要^[19-20]。通过改变摩擦力对其进行敏感性分析,探究摩擦力变化对清管器运动速度、清管时间、清管段塞量的影响。分析一定气量和旁通率下清管器与管壁间摩擦力变化对清管器平均速度、清管时间、清管段塞量的影响(图8、图9,其中横坐标0表示模拟时采用的基准摩擦力,其他数值表示摩擦力在基准值上的变化幅度,正值表示摩擦力增大,负值表示摩擦力减小)。

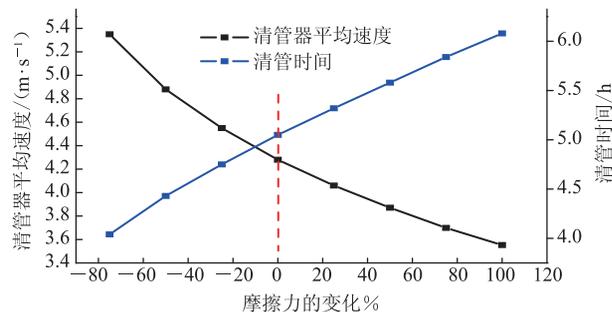


图8 清管器平均速度和清管时间随摩擦力的变化曲线

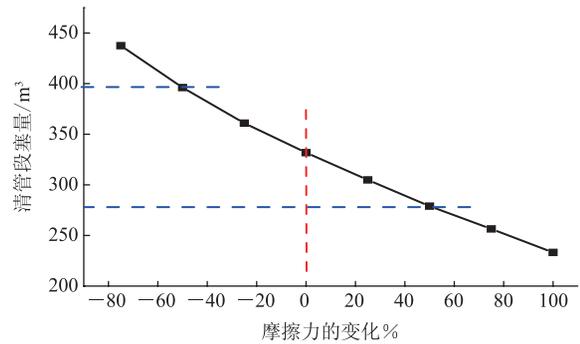


图9 清管段塞量随摩擦力的变化曲线

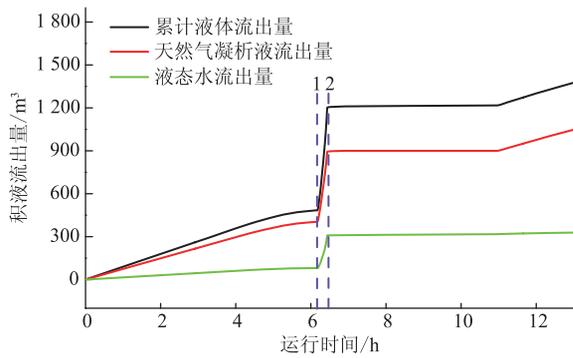
由于摩擦力增大,导致清管器运行阻力增大,运行速度减小,清管时间延长。由于清管器速度决定清管效果,清管器速度减小将使前方积液有更多的时间自流出管道,堆积于清管器前方并形成清管段塞的液量随之减少,进而使清管段塞量随摩擦力增大而降低。当清管器摩擦力偏离基准摩擦力±50%时,终端清管段塞量的波动幅度约偏离基准量±20%。模拟前清管器摩擦力计算不正确,将造成清管器速度、清管段塞量预测偏差过大。通过上述分析可知,摩擦力对清管器的运动和段塞量具有重要影响,因此在实际工程技术应用前,应该准确分析摩擦力,为顺利清管奠定基础。

5 液态水和天然气凝析液的运移规律差异

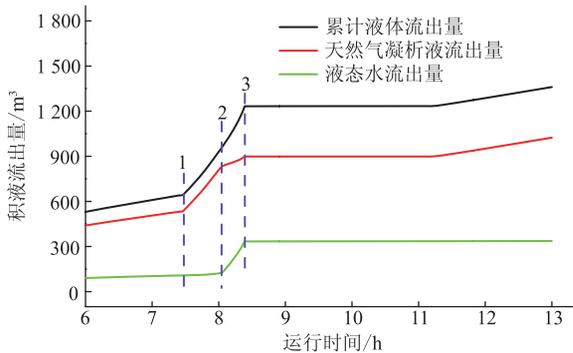
液态水和天然气凝析液由于组分特性的区别,造成二者在射流清管过程中运动规律有所差异。故清管段塞的组成中,两者占比及其随旁通率的变化规律也不同。以水气比 4.0×10^{-5} 进行清管模拟,分析旁通率为0和10%时的终端积液流出特性(图10)。无旁通和有旁通时,终端积液的流出特性存在显著差异。

图10a的虚线1、2分别表示清管段塞头部和尾部流出终端的时刻。对于无旁通的清管器运动,清管器前方的积液具有相同的运动形式,天然气凝析液和液态水相互混合被清管器一起推向终端。两者的头部和尾部同时到达。

而对于有旁通孔的射流清管器,终端的积液流出特性可以分为3个阶段(图10b)。虚线1对应清管段塞头部到达管道终端的时刻,此时流出的清管段塞以天然气凝析液为主,即凝析液的流量开始陡增,斜率发生突变。虚线2对应以液态水为主的清管段塞头部开始流出的时刻,液态水的流量曲线斜率发生突变。此



(a)旁通率为0



(b)旁通率为10%

图10 不同旁通率工况下终端积液流出特性曲线

时凝析液曲线的斜率变平缓,说明在该阶段流出的段塞中,凝析液占比下降,而水的占比上升。虚线3对应的时刻表示清管器到达管道终端,由于清管过程管内积液的排空,水和天然气凝析液在一段时间内无流出量,直至进入气液正常输送环节。

二者运动差异性产生的原因为:旁通孔为气体提供了流通通道,使清管器后方的气体进入清管器前方,对前方积液起到吹扫和携带作用。由于天然气凝析液的密度比水的密度小,因此旁通气流能将轻的凝析液吹向更远的管道,使凝析液的流动速度比水快,故凝析液作为清管液塞头部首先进入管道终端,从而出现了射流清管这种特殊的积液运移形式。

根据不同旁通率下管道终端天然气凝析液和液态水的流量曲线(图11)可见:随着旁通率的增大,终端各流量均减小。然而天然气凝析液和液态水减小的幅度不同。对比旁通率为0和6%的两种工况,随着旁通率增大,天然气凝析液的出口流量迅速降低,而液态水的流量减小幅度不大。

分析不同旁通率下清管段塞总量 V_{PG} 以及天然气凝析液与液态水占段塞总量的比例(表1)。随旁通率的增大,清管段塞总量减小,天然气凝析液和液态水量亦降低。但从占比角度分析:随旁通率的增大,天然气

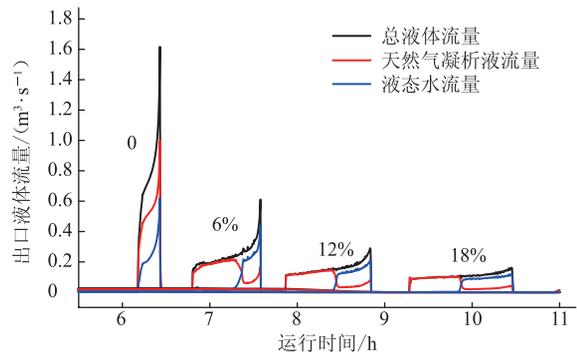


图11 不同旁通率下终端天然气凝析液和液态水的流量曲线

表1 不同旁通率下清管段塞量 V_{PG} 的变化情况

旁通率	清管段塞总量/ m^3	天然气凝析液量/ m^3	液态水量/ m^3	天然气凝析液占比/%	液态水占比/%
0	719.95	491.13	228.82	68.2	31.8
6%	680.47	439.96	240.51	64.7	35.3
12%	548.68	329.19	219.49	60.0	40.0
18%	465.34	257.88	207.46	55.4	44.6

凝析液占清管段塞总量的比例减小,而液态水的占比却增加。射流清管器旁通率的增大可以显著降低凝析液段塞,但对液态水段塞的减小作用较弱,液态水的存在会在一定程度上削弱射流清管效果。

6 结论

(1)清管器平均运行速度随旁通率的增大而减少,二者近似满足线性关系。选择合适的旁通率,可以获得理想的清管器运行速度,进而优化气田的清管操作。随着旁通率的增大,管道终端液体的流量减小,气量波动平缓。

(2)清管器摩擦力计算不准确,是造成清管器速度、清管段塞量预测偏差的重要因素。摩擦力增大将使清管器的运动速度减小,清管段塞量降低。当清管器摩擦力偏离基准摩擦力 $\pm 50\%$ 时,终端清管段塞量的波动幅度将偏离基准量 $\pm 20\%$ 。

(3)对于传统清管器,前方积液具有相同的运动规律,天然气凝析液和液态水混合,一同被推向终端。而对于带旁通孔的射流清管器,终端的清管段塞分别呈现以凝析液为主和以液态水为主的段塞流出特性。

(4)随着旁通率的增大,天然气凝析液占清管段塞总量的比例下降,而液态水的占比却增加。射流清管器旁通率增大可以显著降低凝析液段塞,但对水段塞的消除作用较弱。液态水的存在会在一定程度上削弱射流清管效果。

参考文献:

- [1] TALAIE M R, DEILAMANI K S. A new approach for modeling of gas-condensate flow through pipelines under industrial operating conditions[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 540-555.
- [2] WALTRICH P J, FALCONE G, BARBOSA J R. Liquid transport during gas flow transients applied to liquid loading in long vertical pipes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 68: 652-662.
- [3] LEE H S, AGUSTIAWAN D, JATI K I K, et al. Bypass pigging operation experience and flow assurance study[C]. *Houston: Offshore Technology Conference*, 2012: 1-10.
- [4] VAN S G, ENTABAN A, MOHAMAD A K, et al. Field experience with by-pass pigging to mitigate liquid surge[C]. *Cannes: 16th International Conference on Multiphase Production Technology*, 2013: 299-308.
- [5] DONOGHUE O. Pigging as a flow assurance solution avoiding slug catcher overflow[C]. *Aberdeen: The Pigging Products and Services Association Conference*, 2005: 49-55.
- [6] ENTABAN A, ISMAIL A, JAMBARI M, et al. By-pass pigging - a 'simple' technology with significant business impact[C]. *Beijing: International Petroleum Technology Conference*, 2013: IPTC 16905.
- [7] WU H L, VAN SPRONSEN G. Slug reduction with high by-pass pigs—a mature technology[C]. *Barcelona: 12th International Conference on Multiphase Production Technology*, 2005: 313-325.
- [8] OLANIYAN Y, LARREY D. Bypass pig modeling - A three phase gas condensate pipeline field case[C]. *Banff: 9th North American Conference on Multiphase Technology*, 2014: 499-512.
- [9] DEN HEIJER A. Frictional behaviour of pigs in motion[D]. *Delft: Delft University of Technology*, 2016: 3-6.
- [10] GROOTE G A, VAN DE CAMP P B J, VEENSTRA P, et al. By-pass pigging without or with speed control for gas-condensate pipelines[C]. *Abu Dhabi: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 2015: SPE-177819-MS.
- [11] MONEY N, COCKFIELD D, MAYO S, et al. Dynamic speed control in high velocity pipelines[J]. *PPSA Pipelines & Gas Journal*, 2012, 239(8): 30-38.
- [12] NGUYEN T T, YOO H R, RHO Y W, et al. Speed control of pig using bypass flow in natural gas pipeline[C]. *Pusan: IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2001: 863-868.
- [13] NGUYEN T T, KIM S B, YOO H R, et al. Modeling and simulation for pig with bypass flow control in natural gas pipeline[J]. *KSME International Journal*, 2001, 15(9): 1302-1310.
- [14] MIRSHAMSI M, RAFEEYAN M. Speed control of pipeline pig using the QFT method[J]. *Oil & Gas Science and Technology*, 2012, 67(4): 693-701.
- [15] ZHU X, ZHANG S, TAN G, et al. Experimental study on dynamics of rotatable bypass-valve in speed control pig in gas pipeline[J]. *Measurement*, 2014, 47: 686-692.
- [16] SINGH A, HENKES R. CFD modeling of the flow around a by-pass pig[C]. *Banff: 8th North American Conference on Multiphase Technology*, 2012: 229-243.
- [17] AZPIROZ J E, HENDRIX M H W, BREUGEM W P, et al. CFD modelling of bypass pigs with a deflector disk[C]. *Cannes: 17th International Conference on Multiphase Production Technology*, 2015: 141-155.
- [18] IDELCHIK I E. *Handbook of hydraulic resistance*[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press Inc, 1994: 223-224.
- [19] HENDRIX M H W, DEN HEIJER A, BREUGEM W P, et al. Frictional forces during pigging of multiphase pipelines[C]. *Banff: 10th North American Conference on Multiphase Technology*, 2016: 103-114.
- [20] ZHU X, ZHANG S, LI X, et al. Numerical simulation of contact force on bi-directional pig in gas pipeline: At the early stage of pigging[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 23: 127-138.

(收稿日期:2017-01-06; 修回日期:2017-10-12; 编辑:刘朝阳)

基金项目: 国家科技重大专项资助项目“深水天然气凝析液控砂与射流清管技术”, 2016ZX05028-004-003.

作者简介: 陈建恒,男,1992年生,在读硕士生,2015年毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业,现主要从事多相管流及油气田集输技术相关研究。地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号,266580。电话:18353244336,Email: s15060742@s.upc.edu.cn

通讯作者: 何利民,男,1962年生,教授,博士生导师,2002年博士毕业于西安交通大学动力工程与工程热物理专业,现主要从事多相管流及油气田集输技术相关研究。地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号,266580。电话:13863908229,Email: helimin@upc.edu.cn